

ارزیابی خصوصیات نگهداشت آب خاک کربناته‌ی جزیره‌ی هرمز

سعید کوزه‌گران (دانشجوی دکتری)

حبیب شاه‌نظری* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

یاسر جعفریان (دانشیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۳۸-۲۹

خاک‌های کربناته‌ی اسکلتی، خاک‌هایی با ترکیب‌های کربناتی، مانند صدف‌ها و صخره‌های مرجانی خرد شده هستند که عموماً در مناطق گرم حاره‌یی و استوایی در جهان یافت می‌شوند. در پژوهش حاضر، به عنوان گامی پایه‌یی و مهم در ارزیابی رفتار غیراشباع خاک‌های کربناته، به مطالعه‌ی رفتار خاک‌های مذکور در شرایط غیراشباع شامل پتانسیل نگهداشت آب و رفتار هیستریزس هیدرولیکی آن‌ها پرداخته شده است. مطالعات کنونی بر روی خاک کربناته‌ی جزیره‌ی هرمز با دانه‌بندی‌های مختلف صورت گرفته و نتایج حاصل با نتایج آزمایش‌های مشابه بر روی خاک سیلیکاته‌ی کشور هلند با دانه‌بندی مشابه به عنوان خاک مرجع مقایسه شده است. همچنین حفره‌های درون ذره‌یی و بافت خاص خاک کربناته و تأثیر آن در رفتار خاک کربناته در شرایط غیراشباع ارزیابی شده است. آزمایش‌های پژوهش حاضر، در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه پلی‌تکنیک فدرال لوزان انجام شده است.

واژگان کلیدی: خاک غیراشباع، خاک کربناته، منحنی مشخصه‌ی آب - خاک (SWCC)، دستگاه صفحه‌ی فشار، ادمتر مکش کنترل، تخلخل سنجی جیوه‌ی (MIP)، تصویرهای میکروسکوپ الکترونی (SEM).

s.kouzegaran@civileng.iust.ac.ir
hshahnazari@iust.ac.ir
yjafarianm@iiees.ac.ir

۱. مقدمه

منحنی مشخصه‌ی آب - خاک (SWCC)^۱، نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی میان مقدار آب موجود در خاک مشخص و مکش ساختاری خاک مذکور و عاملی مهم در رفتار خاک‌ها در شرایط غیراشباع است. مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های غیراشباع، مانند: ضریب نفوذپذیری، مقاومت برشی و تغییر حجم به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به نمودار SWCC مرتبط می‌شود. همچنین در زمینه‌ی مهندسی کشاورزی، پارامتر SWCC عاملی تأثیرگذار در فرسایش، زهکشی و حاصلخیزی خاک و در نتیجه رشد گیاه است. در زمینه‌ی زیست‌محیطی نیز SWCC نقش تعیین‌کننده‌یی در مطالعات انتقال و کنترل آلودگی‌ها در خاک ایفا می‌کند.^[۲-۶]

مکش ساختاری درون یک نمونه‌ی خاک به صورت مستقیم یا غیرمستقیم قابل کنترل و اندازه‌گیری است. در روش‌های مستقیم، فشار آب حفره‌یی منفی مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود و شامل روش‌های مبتنی بر انتقال محور^۲ (مانند دستگاه صفحه‌ی فشار^۳ و...) و تنسیومتر و... هستند. در روش‌های غیرمستقیم، به جای اندازه‌گیری مستقیم فشار آب حفره‌یی منفی، متغیر دیگری اندازه‌گیری می‌شود که سپس با استفاده از کالیبراسیون‌های مناسب به مکش خاک همپسته می‌شوند. روش‌های غیرمستقیم، شامل اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی و حرارتی یک حس‌گر در تماس با توده‌ی خاک و کاغذ صافی است.^[۷] روش‌های اندازه‌گیری مستقیم مکش ساختاری، از

درک صحیح رفتار خاک‌های غیراشباع بدون شناخت آثار مکش ممکن نیست. رفتار خاک‌های غیراشباع به میزان زیادی به مقدار مکش درون آن وابسته است. در طبیعت، مکش خاک در حقیقت پتانسیل جذب و نگهداری آب توسط خاک، در رطوبتی مشخص و بیانگر فشار منفی درون منافذ خاک است که با کاهش درصد رطوبت افزایش می‌یابد و پتانسیل نگهداشت آب در خاک (رابطه‌ی بین رطوبت خاک و مکش) تابعی از: اندازه شکل و جنس ذرات خاک است. مکش ساختاری به صورت تفاضل فشار هوا و آب ($u_a - u_w$) معرفی می‌شود و عموماً (در شرایطی که سیال منفذی فاقد هرگونه نمک حل‌شده‌یی باشد) جزء غالب مکش کل به‌خصوص در خاک‌های غیرچسبنده‌ی غیرخمیری است.^[۱] در اغلب مسائل ژئوتکنیکی، درصد رطوبت خاک و در نتیجه مکش ساختاری، با شرایط آب و هوایی محیط پیرامون تغییر می‌کند؛ لذا در اغلب مطالعات، مکش ساختاری به عنوان عاملی تأثیرگذار در رفتار خاک کنترل و اندازه‌گیری می‌شود.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۴/۴، اصلاحیه ۱۳۹۸/۸/۲۲، پذیرش ۱۳۹۸/۹/۱۱

DOI:10.24200/J30.2019.53727.2581

سازه‌های مهم و راهبردی در این منطقه، بررسی‌های ژئوتکنیکی دقیق‌تر ضروری است.

به عبارت دیگر، اهداف اصلی پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- ارزیابی حفره‌های درون‌ذره‌یی و بافت خاک کربناته و تأثیر آن در رفتار خاک کربناته در شرایط غیراشباع.
- مطالعه‌ی پتانسیل نگهداشت آب و رفتار هیستریزس هیدرولیکی برای خاک کربناته به عنوان گامی پایه‌یی در ارزیابی رفتار غیراشباع آن‌ها.
- مقایسه‌ی رفتار غیراشباع خاک کربناته با خاک سیلیکاته با دانه‌بندی یکسان.

۲.۱. روش انجام پژوهش

در ادامه، برای نیل به هدف پژوهش حاضر، ابتدا نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)^۵، از ذرات خاک کربناته و سیلیکاته و همچنین نتایج آزمایش تخلخل‌سنجی جیوه‌یی (MIP)^۶، بر روی نمونه‌های خاک کربناته گزارش شده است. از نتایج آن‌ها برای مطالعه و تفسیر بهتر تأثیر حفره‌های درون‌ذره‌یی خاک کربناته در رفتار نگهداشت آب خاک کربناته در مقایسه با خاک سیلیکاته استفاده شده است. سپس نتایج آزمایش‌های صفحه‌ی فشار جهت ارزیابی پتانسیل نگهداشت آب خاک کربناته برای دانه‌بندی‌های مختلف آن و مقایسه‌ی آن با دانه‌بندی‌های مشابه خاک سیلیکاته بررسی شده است. در ادامه، نیز با کمک نتایج آزمایش‌های ادومتر کنترل مکش، رفتار هیستریزس هیدرولیکی خاک کربناته مطالعه و با خاک سیلیکاته با دانه‌بندی یکسان مقایسه شده است. کلیه‌ی آزمایش‌های غیراشباع در آزمایشگاه مکانیک خاک^۷ دانشگاه پلی‌تکنیک فدرال لوزان (EPFL)^۸ انجام شده است.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲.۱. خواص ژئوتکنیکی خاک

مطالعات پژوهش حاضر، بر روی سه دانه‌بندی از خاک کربناته و دو دانه‌بندی از خاک سیلیکاته انجام شده است. سه دانه‌بندی مورد مطالعه برای خاک کربناته عبارت‌اند از: $G_0 - Ca$ (شامل ۱۰۰٪ خاک ماسه‌یی)، $G_1 - Ca$ (۷۵٪ ماسه و ۲۵٪ ریزدانه) و $G_2 - Ca$ (شامل ۵۰٪ ماسه و ۵۰٪ ریزدانه) و دو دانه‌بندی برای خاک سیلیکاته عبارت‌اند از: $G_1 - Si$ (شامل ۷۵٪ ماسه و ۲۵٪ ریزدانه) و $G_2 - Si$ (شامل ۵۰٪ ماسه و ۵۰٪ ریزدانه). جهت ایجاد امکان مقایسه‌ی مناسب، دانه‌بندی‌های یکسانی برای خاک کربناته و سیلیکاته تهیه شد. لازم به ذکر است خاک‌های استفاد شده در پژوهش حاضر با استاندارد ASTM D۲۲۳-۶۶ تحت آزمایش حدود اتربرگ قرار گرفتند. براساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها، خاک‌های مورد بررسی فاقد حالت خمیری بودند.

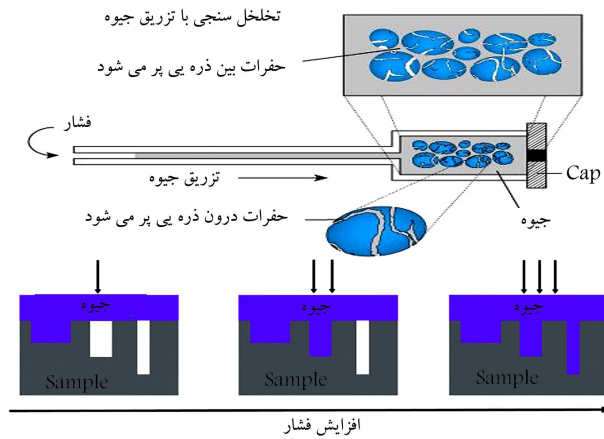
جهت تأمین دانه‌بندی مشابه برای بخش ماسه‌یی (بخش مانده بر روی الک #۲۰۰ ASSHTO) دانه‌بندی‌های G_1 و G_2 ، از آنالیز الک استفاده شده است. برای تأمین دانه‌بندی یکسان برای بخش سیلتی خاک (بخش عبوری بر روی الک #۲۰۰ ASSHTO)، مانده روی الک (۱۵mm/۰/۱۰۰) #۱۰۰ با استفاده از ضربه‌های دستگاه پروکتور استاندارد خرد شد. ابتدا با سعی و خطاهای مکرر، تعداد ضربه‌های لازم برای خرد کردن ۳۰۰ گرم خاک کربناته و سیلیکاته جهت رسیدن به دانه‌بندی یکسان صورت گرفت و هر بار آزمایش هیسترومتری (ASTM D۷۹۲۸) بر روی خاک‌های خرد شده‌ی عبوری از الک (۷۵mm/۰/۲۰۰) #۲۰۰ انجام شد. پس از

جمله روش انتقال محور، کاربرد بیشتری در مهندسی ژئوتکنیک دارند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه‌ی مکانیک خاک غیراشباع صورت گرفته است. با وجود این، انتظار می‌رود با توجه به وابستگی پتانسیل نگهداشت آب - خاک به بافت خاک‌ها، بسته به محل پیدایش، خاک‌ها رفتار متفاوتی در شرایط غیراشباع از خود بروز دهند. به‌عنوان مثال، بتولا و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که رفتار غیراشباع خاک‌ها در محیط‌های معتدل و مرطوب حاره‌یی به دلیل تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها متفاوت بوده است، لذا بر لزوم مطالعه‌ی تکمیلی رفتار غیراشباع خاک‌ها در محیط‌های حاره‌یی تأکید کرده‌اند.^[۸]

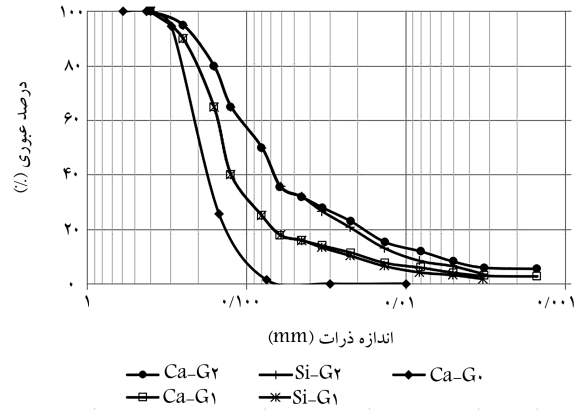
مطالعات در زمینه‌ی رفتار غیراشباع خاک‌های کربناته نیز به علت بافت منحصر به فرد آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. خاک‌های مذکور عموماً در مناطق گرم حاره‌یی و استوایی و بین عرض جغرافیایی ۳۰ درجه‌ی شمالی و جنوبی، شامل مناطقی مانند: خلیج فارس، استرالیا، گوام و هاوایی و در طول بخش‌هایی از نواحی ساحلی ایالات متحده یافت می‌شوند. مطالعات زمین‌شناسی اخیر نشان می‌دهند که ۳۵٪ از سطح اقیانوس‌ها را خاک‌های کربناته در بر می‌گیرد.^[۹] به‌خاطر بروز مشکلاتی در پی سازه‌های فراساحلی در خاک‌های مذکور، بررسی رفتار آن‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته است. خاک‌های کربناته‌ی اسکلتی، خاک‌هایی با ترکیب‌های کربناتی اسکلتی، مانند صدف‌ها و صخره‌های مرجانی خرد شده هستند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک‌های کربناته که رفتار آن‌ها را از خاک‌های سیلیکاته متمایز می‌سازد، حفره‌های درون‌ذره‌یی^۴ آن است.^[۱۰-۱۲] حفره‌های درون‌ذره‌یی در اثر شکسته شدن ناقص پوسته‌ها و یا وجود منافذ ذاتی درونی یا سطحی در مرجان‌ها به وجود آمده است. در نتیجه، با توجه به بافت متخلخل ویژه‌ی خاک کربناته از یک طرف و قابلیت ذاتی جذب آب توسط مصالح متخلخل از طرف دیگر، انتظار می‌رود خاک‌های کربناته، رفتار پیچیده‌تری نسبت به خاک‌های سیلیکاته در شرایط غیراشباع بروز دهند. مطالعات متعدد نشان داده است که تفاوت بسیاری بین ویژگی‌ها و رفتار ژئوتکنیکی ماسه‌های سیلیکاته و کربناته وجود دارد.^[۱۳-۱۹] اگرچه در سال‌های اخیر، مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار مهندسی خاک‌های کربناته انجام شده است، اما مطالعات مذکور با تمرکز بر رفتار خاک‌های کربناته در شرایط اشباع بوده و رفتار آن‌ها در شرایط غیراشباع ناشناخته باقیمانده است. این در حالی است که خاک‌های کربناته‌یی که تحت شرایط غیراشباع باشند، سهم قابل ملاحظه‌یی از زیرسازی سازه‌های کلیدی را در بر گرفته‌اند. این امر به‌خصوص در نواحی ساحلی که عموماً در آن‌ها تأسیسات تجاری وسیعی، مانند: هتل‌ها، بندرها و همچنین مناطق مسکونی با تراکم جمعیتی بالا وجود دارد، چشمگیرتر است.

۱.۱. اهداف پژوهش حاضر

لذا هدف اصلی پژوهش حاضر، مطالعه‌ی رفتار خاک کربناته در شرایط غیراشباع است که این مهم برای اولین بار است که برای خاک‌های کربناته بررسی می‌شود. خاک کربناته‌ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر از جزیره‌ی هرمز ایران انتخاب شده است. همچنین جهت مقایسه‌ی رفتار خاک‌های کربناته و سیلیکاته، خاک سیلیکاته‌ی کشور هلند به عنوان خاک مرجع نیز آزمایش شده است. خاک جزیره‌ی هرمز به دلیل ویژگی‌های کانی‌شناسی، درصد بالای کربنات کلسیم (حدود ۷۵٪) و منافذ درون‌ذره‌یی قابل ملاحظه و سطح مضرس آن، گزینه‌ی مناسبی برای این گونه مطالعات است. خاک کربناته در مطالعات دیگری نیز توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است.^[۱۹-۲۲] علاوه بر این، جزیره‌ی هرمز یکی از مناطق بسیار راهبردی در تنگه‌ی هرمز بین خلیج فارس و دریای عمان است، در نتیجه به دلیل پیش‌بینی احداث



شکل ۲. شماتیک عملکرد دستگاه تخلخل سنج جیوه‌بی.



شکل ۱. دانه‌بندی‌های خاک‌های کربناته و سیلیکاته.

حصول نتیجه‌ی مناسب (دانه‌بندی یکسان برای دو خاک)، تعداد ضربه‌های مشابه برای تهیه‌ی بقیه‌ی خاک ریزدانه‌ی لازم اعمال شد. دانه‌بندی‌هایی که نهایتاً برای خاک‌های سیلیکاته و کربناته به‌دست آمده و استفاده شده‌اند، در شکل ۱ مشاهده می‌شوند.

۲.۲. معرفی آزمایش‌ها

۲.۲.۱. عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM)

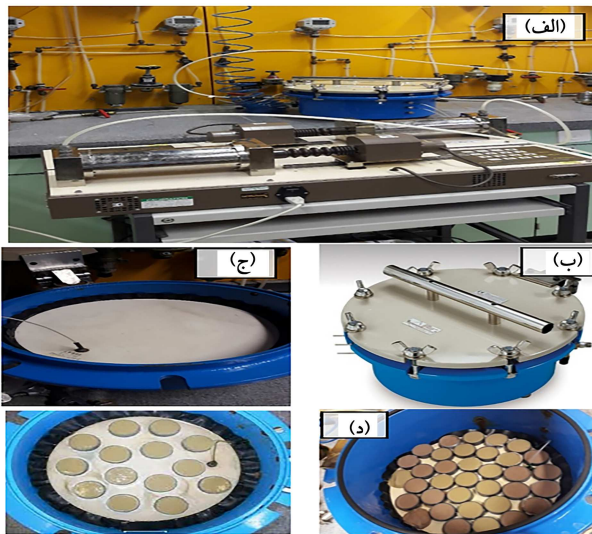
میکروسکوپ‌های الکترونی، از جمله ابزارهای مهم جهت تصویربرداری از مواد گوناگون هستند. در پژوهش حاضر به جهت بررسی حفره‌های درون ذره‌ی خاک کربناته‌ی جزیره‌ی هرمز و مقایسه‌ی بافت خاک‌های سیلیکاته و کربناته‌ی تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای هر دو خاک تهیه و ارائه شده است.

۲.۲.۲. تخلخل‌سنجی جیوه‌بی (MIP)

تخلخل‌سنجی با تزریق جیوه، روشی قدرتمند جهت بررسی توزیع، ابعاد و حجم حفره‌ها برای انواع مصالح است. دستگاه تخلخل‌سنج از استوانه‌یی تشکیل شده است که نمونه در داخل آن قرار داده شده و قبل از تزریق جیوه، در شرایط خلأ قرار گرفته است. جیوه به وسیله‌ی دستگاه کنترل فشار با قابلیت اندازه‌گیری دقیق حجم، به استوانه تزریق می‌شود و فشار آن به تدریج بالا می‌رود. در این میان، فشار و حجم جیوه به‌صورت پیوسته ثبت می‌شود. اساس اندازه‌گیری تخلخل با روش ذکر شده به این صورت است که با اندازه‌گیری میزان فشار لازم برای مقابله با کشش سطحی مایع (نیروی موینگی) و ورود آن به حفره‌یی با قطر مشخص می‌توان ابعاد حفره‌ها را محاسبه کرد. برای حفره‌های بزرگ‌تر، فشار موینگی کمتر است؛ لذا عدد ورودی جیوه به داخل آن‌ها کوچک‌تر است. به عبارت دیگر، جیوه ابتدا وارد درشت‌ترین حفره‌ها می‌شود؛ و به تدریج با افزایش فشار، جیوه به حفره‌های کوچک‌تر وارد می‌شود (شکل ۲). لذا ارتباط مستقیمی بین اندازه‌ی حفره‌ها و فشار ورود جیوه به داخل آن‌ها وجود دارد و با توجه به فشار اعمالی در هر مرحله، با اندازه‌گیری میزان جیوه‌ی جذب شده توسط نمونه می‌توان ابعاد، توزیع، و حجم حفره‌ها را اندازه‌گیری کرد.

۳.۲.۲. آزمایش صفحه‌ی فشار

در مطالعه‌ی حاضر، از دو دستگاه صفحه‌ی فشار ساخت شرکت American Soil Moisture Equipment Corporation جهت دستیابی به نمودار SWCC استفاده شد (شکل ۳). آزمایش صفحه‌ی فشار بر روی سه دانه‌بندی از خاک کربناته (Ca-G^۰, Ca-G^۱, Ca-G^۲) و دو دانه‌بندی از خاک سیلیکاته (Si-G^۱ و Si-G^۲) انجام شده است. اجزاء دستگاه صفحه‌ی فشار، شامل: محفظه‌ی فشاری،



الف) نمای کامل دستگاه و تجهیزات مربوطه؛
ب) محفظه دستگاه؛
ج) دیسک سرامیکی HAEV؛
د) نمونه‌های آزمایش.

شکل ۳. صفحه‌ی فشار و کمپرسور هوا و دستگاه‌های کنترل فشار/حجم.

صفحات سرامیکی با عدد ورودی هوای بالا (HAEV)^۹، منبع تأمین فشار هوای فشرده، سیستم کنترل آب خروجی و ... است (شکل ۳). برای ساخت نمونه، ابتدا خاک با رطوبت ۱۰٪ تهیه و به مدت ۲۴ ساعت داخل کیسه‌های پلاستیکی عایق نگهداری شد، تا رطوبت به‌صورت یکنواخت در آن توزیع شود. سپس هر نمونه با روش کوبش مرطوب با چگالی نسبی ۶۰٪ (چگالی نسبی فقط برای نمونه‌های Ca-G^۰، ۷۵٪ بود) تهیه شد. قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها از طریق مستغرق شدن در آب (هر نمونه تا ارتفاع ۲ میلی‌متر پایین‌تر از لبه‌ی قالب) به مدت ۱۲ ساعت اشباع شدند. سپس نمونه‌ها بر روی دیسک سرامیکی HAEV اشباع با عدد ورودی هوای ۰/۳ و ۰/۵ مگاپاسکال (بسته به بازه‌ی مکش موردنظر)، درون دستگاه قرار گرفتند (شکل ۳) و جهت ایجاد اتصال بهتر بین نمونه‌ی خاک و دیسک سرامیکی، برای هر نمونه، کاغذ صافی بین آن‌ها قرار داده شد. در حین آزمایش، فشار آب ثابت و برابر فشار اتمسفر تنظیم و مکش از طریق اعمال فشار هوا به‌وسیله‌ی کمپرسور اعمال شد. در هر مرحله تا رسیدن نمونه به تعادل، فشار هوا ثابت نگه داشته می‌شد. جهت اطمینان از دست یافتن به تعادل، شیلنگ زهکش دیسک سرامیکی به یک

خروجی نیز از طریق دستگاه کنترل فشار/حجم اندازه‌گیری شد. هر مرحله، اعمال مکش تا رسیدن نمونه به تعادل ادامه پیدا می‌کرد. سپس مکش بعدی با افزایش (یا کاهش) فشار هوا و با ثابت نگه داشتن فشار آب اعمال می‌شد. تغییر حجم نمونه‌ها نیز در حین آزمایش از طریق اندازه‌گیری تغییر ارتفاع نمونه توسط LVDTی ۱° که در تماس با محور بارگذاری مستقر بر بالای نمونه بود، محاسبه شد.

۳. نتایج آزمایش‌ها و بحث

۱.۳. ارزیابی بافت خاک کر بناته

۱.۱.۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

به جهت بررسی حفره‌های درون ذره‌ی خاک کر بناته‌ی جزیره‌ی هرمز، تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. همچنین برای مقایسه‌ی بهتر خاک‌های سیلیکاته و کر بناته، تصاویر SEM از خاک سیلیکاته‌ی هلند (خاک مرجع) در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که در تصاویر مشخص است، برخلاف ذرات خاک سیلیکاته‌ی هلند، ذرات خاک هرمز، حفره‌های درون‌دانه‌ی قابل توجه با اندازه‌های مختلف دارند. حفره‌های مذکور از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد مصالح کر بناته در مقایسه با مصالح سیلیکاته است.

۲.۱.۳. نتایج آزمایش تخلخل سنج جیوه‌ای خاک کر بناته هرمز

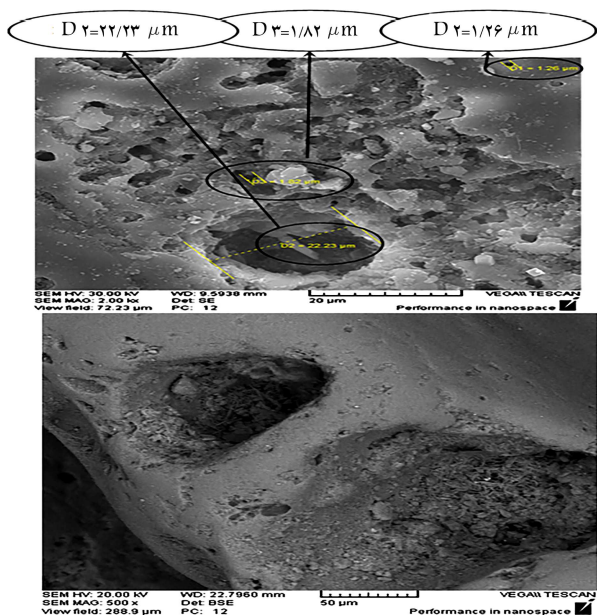
جهت بررسی و کمی‌سازی میزان حفره‌ها در دانه‌بندی‌های مختلف خاک کر بناته‌ی جزیره‌ی هرمز، آزمایش MIP بر روی هر سه دانه‌بندی G_1 -Ca، G_0 -Ca و G_2 -Ca خاک مذکور انجام شد. آزمایش کنونی توسط دستگاه تخلخل‌سنج Pascal ۱۴۰، Thermo Finnigan Italia S.P.A، انجام شده که قابلیت اعمال فشار جیوه‌ی بیشینه‌ی ۴۰۰ مگاپاسکال و اندازه‌گیری ماکرو حفره‌ها با ابعاد ۵ تا ۱۴۰ میکرومتر را دارد. نتایج آزمایش اخیر در شکل ۷ و جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان حفره‌های درون ذره‌ی خاک کر بناته‌ی هرمز قابل ملاحظه است. متداول‌ترین قطر حفره‌ها برای سه دانه‌بندی G_0 ، G_1 و G_2 به ترتیب برابر با ۵۱/۹۴، ۳۸/۲۰ و ۱۷/۱۱ میکرومتر و تخلخل درون ذره‌ی به

دستگاه کنترل فشار/حجم متصل و تغییرات حجم آب خروجی از دستگاه رصد شد (با دقت ۱۰ میلی‌مترمکعب) و تا زمانی که مقدار آب خروجی تقریباً متوقف شد، اعمال مکش ادامه یافت.

لازم به ذکر است که برخی پژوهشگران، برای بررسی تعادل نمونه، در فواصل زمانی مشخص، نمونه‌ی را از دستگاه خارج و با بررسی تغییر وزن آن، تعادل نمونه را بررسی می‌کنند (هنگامی که نمونه به تعادل برسد، وزن آن نمونه ثابت می‌شود). اما در روش مذکور با هر بار خارج کردن نمونه‌ی اتصال‌های فاز آب داخل نمونه و آب درون دیسک سرامیکی دچار ناپوستگی شده و این منبع خطایی در نتیجه‌ی آزمایش است. لذا در صورت وجود امکانات کافی، رصد حجم آب خروجی از نمونه‌ها (روش استفاده شده در پژوهش حاضر) روش بسیار دقیق‌تری محسوب می‌شود. بعد از مرحله‌ی به تعادل رسیدن رطوبت درون نمونه‌ها، ۳ نمونه از دستگاه خارج و در صد رطوبت آن‌ها اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد. محصول مرحله‌ی کنونی، یک نقطه بر روی نمودار SWCC محسوب می‌شود. در ادامه، در فرآیندی مشابه، فشار هوا و در نتیجه مکش افزایش یافته و مراحل فوق تکرار شده است.

۴.۲.۲. آزمایش ادومتر مکش کنترل

مطالعات بخش حاضر با استفاده از دستگاه ادومتر با قابلیت کنترل مکش که به سفارش آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه پلی‌تکنیک فدرال لوزان ساخته شده است، صورت گرفته است. اجزاء اصلی دستگاه ادومتر، شامل: محفظه‌ی دستگاه، دیسک سرامیکی HAE، محور اعمال بار، قاب بارگذاری (مشابه ادومتر کلاسیک)، سیستم‌های اعمال فشار و اندازه‌گیری ورود و خروج آب و هواست (شکل ۴). برای ساخت نمونه، ابتدا خاک با رطوبت ۱۵٪ تهیه و به مدت ۲۴ ساعت داخل کیسه‌های پلاستیکی عایق نگهداری شد تا رطوبت یکنواخت در آن به وجود بیاید. سپس هر نمونه با روش کوبش مرطوب با چگالی نسبی ۶۰٪ تهیه شد. نمونه‌ی اشاره شده با قطر ۶/۳۰ cm و ارتفاع ۱/۶۶ cm درون محفظه‌ی دستگاه و بر روی دیسک سرامیکی HAE با عدد ورودی هوای ۰/۳ Mpa قرار داده شد. جهت ایجاد اتصال بهتر بین نمونه‌ی خاک و دیسک سرامیکی، کاغذ صافی بین آن‌ها قرار داده شد. در دستگاه مذکور، مکش از طریق روش انتقال محور از طریق اعمال فشار آب و هوا به‌وسیله‌ی دستگاه‌های کنترل فشار/حجم (شکل ۴الف) اعمال شد. فشار هوا از بالای نمونه و فشار آب از زیر دیسک سرامیکی وارد شد. حجم آب ورودی و



شکل ۵. تصاویر SEM از ذرات خاک کر بناته‌ی هرمز.



الف) نمای کامل دستگاه و تجهیزات مربوطه؛
ب) محفظه دستگاه؛
ج) دیسک سرامیکی HAE؛
د) نمونه‌های آزمایش.

شکل ۴. دستگاه ادومتر مکش کنترل.

جدول ۱. خلاصه‌ی نتایج آزمایش MIP برای سه دانه‌بندی خاک کر بناته‌ی جزیره‌ی هرمز.

نوع دانه‌بندی	متداول‌ترین قطر حفره‌ها (μm)	تخلخل درون‌ذره‌یی (%)
Ca-G ^o	۵۱٫۹۴	۱۹٫۲
Ca-G _۱	۳۸٫۲۰	۱۵٫۱
Ca-G _۲	۱۷٫۱۱	۱۱٫۶

ترتیب برابر با ۱۹٫۲، ۱۵٫۱ و ۱۱٫۶ درصد بوده و با افزایش درصد ریزدانه، تخلخل درون‌ذره‌یی، حجم حفره‌ها در واحد جرم خاک و متداول‌ترین قطر حفره‌های نمونه کاهش یافته است. واضح است که این امر به دلیل کاهش اندازه‌ی ذرات خاک است.

۲.۳. نتایج آزمایش‌های صفحه‌ی فشار

۱.۲.۳. مقایسه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک خاک‌های کر بناته و سیلیکاته

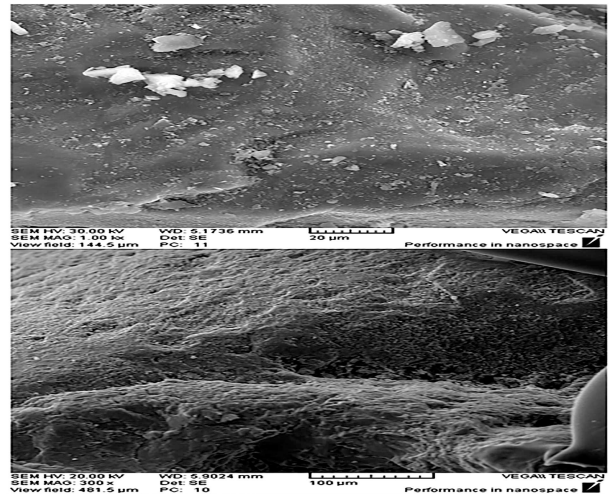
نتایج آزمایش صفحه‌ی فشار برای دانه‌بندی‌های مختلف خاک‌های کر بناته و سیلیکاته در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن، SWCC برای دانه‌بندی G_۱ دو خاک کر بناته و سیلیکاته تا حدود ۲۰ کیلوپاسکال و برای دانه‌بندی G_۲ تا حدود ۴۰ کیلوپاسکال یکسان و نمودارها بر هم منطبق است. اما در مکش‌های بالاتر، نمودارهای آن‌ها از هم فاصله گرفته است، بدین صورت که خاک کر بناته در مکش‌های یکسان، پتانسیل نگهداشت آب بیشتری نسبت به خاک سیلیکاته دارد.

این امر به دلیل وجود حفره‌های درون‌ذره‌یی در خاک کر بناته است. حفره‌ها، به علت کوچک بودن در مکش‌های پایین، اشباع می‌مانند و آب ابتدا از حفره‌های بین‌ذره‌یی (که بزرگ‌تر هستند) تخلیه می‌شود. در واقع، در مکش‌های کم، حفره‌های بین‌ذره‌یی عامل تعیین‌کننده در شکل SWCC به حساب می‌آیند، لذا به دلیل یکسان بودن دانه‌بندی و در نتیجه حفره‌های بین‌ذره‌یی دو خاک، نمودار SWCC آن‌ها در مکش‌های کم تقریباً یکسان است. اما در مکش‌های بالاتر، حفره‌های درون‌ذره‌یی خاک کر بناته، نقش پررنگ‌تری در پتانسیل نگهداشت آب خاک کر بناته ایفا می‌کنند و سرعت زهکشی شدن آب در خاک کر بناته کمتر است، زیرا خروج آب از حفره‌های درون‌ذره‌یی آن‌ها مستلزم مکش‌های بالاتری است. جهت مقایسه‌ی بهتر قابلیت نگهداشت آب در دانه‌بندی‌های مختلف خاک‌های کر بناته و سیلیکاته، نسبت درجه‌های اشباع آن‌ها در سه مکش نهایی اعمالی (۱۴۸، ۲۹۰ و ۴۹۰ کیلوپاسکال) در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت درجه‌های اشباع نمونه‌های کر بناته به سیلیکاته در سه مکش (S_{rca}/S_{rsi}) نهایی اعمالی، برای دانه‌بندی G_۱ بزرگ‌تر از دانه‌بندی G_۲ بوده است:

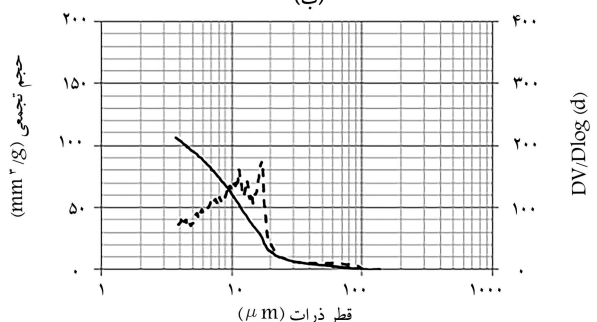
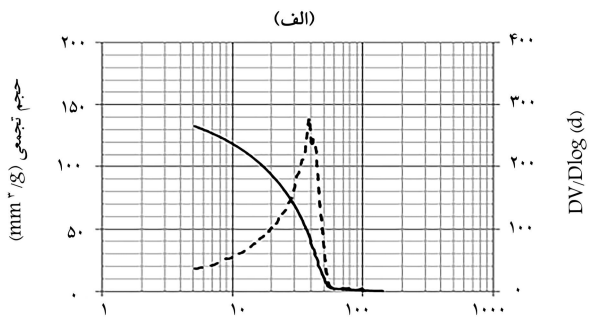
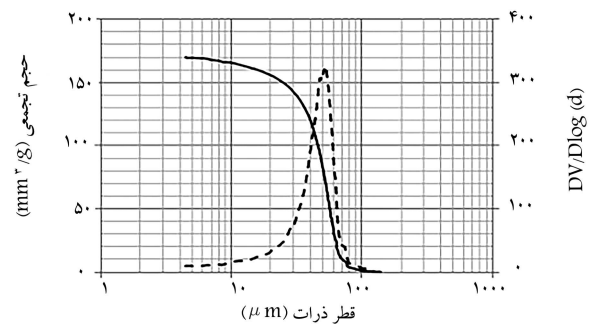
$$(S_{rca}/S_{rsi})_{G_1} > (S_{rca}/S_{rsi})_{G_2}$$

زیرا همان‌طور که آزمایش‌های MIP نشان داد (شکل ۷)، دانه‌بندی G_۱ نسبت به دانه‌بندی G_۲ تخلخل درون‌ذره‌یی بیشتری دارد.

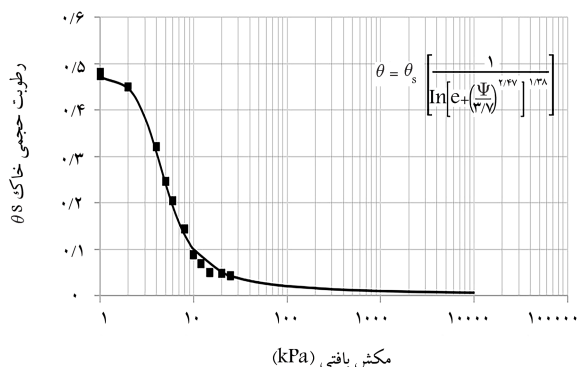
۲.۳.۳. نمودارهای انطباقی SWRC برای خاک‌های کر بناته و سیلیکاته
رسم نمودار SWCC برای یک خاک مشخص با اندازه‌گیری مکش، زمان‌بر بوده و به‌دست آوردن نقاط متعدد نمودار SWCC مستلزم آزمایش‌های متعدد است.^[۵۴] از طرف دیگر، در بسیاری از موارد برای استفاده از نتایج آزمایش‌های مذکور نیاز است که منحنی پیوسته‌ی آن وجود داشته باشد. لذا مدل‌های بسیاری توسط پژوهشگران



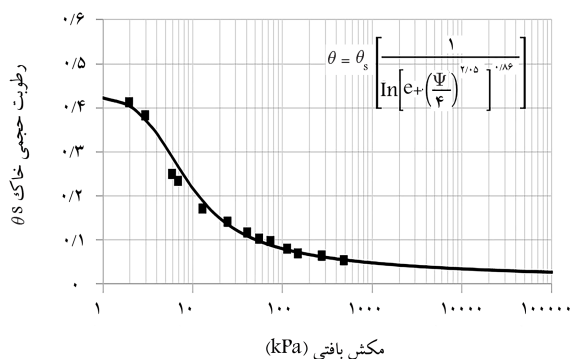
شکل ۶. تصاویر SEM از ذرات خاک سیلیکاته‌ی هلند.



شکل ۷. نتایج آزمایش MIP بر روی دانه‌بندی‌های مختلف خاک کر بناته.



■ Ca-G₀ - آزمایش صفحه فشار - Fredlund-Xing (۱۹۹۴) fit
 شکل ۹. نمودار انطباقی SWRC برای خاک Ca-G₀.



■ Ca-G₁ - آزمایش صفحه فشار - Fredlund-Xing (۱۹۹۴) fit
 شکل ۱۰. نمودار انطباقی SWRC برای خاک Ca-G₁.

انطباقی $(F - X)$ که به باور بسیاری از پژوهشگران از بهترین روابط انطباقی موجود است: [۳۰، ۲۶]

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \right] \quad (۱)$$

که در آن:

$$a = \psi_i$$

$$m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m \theta_s} 3.72 s \psi_i$$

$$s = \frac{\theta_i}{\psi_p - \psi_i}$$

که در آن‌ها:

θ : درصد رطوبت حجمی،

θ_s : درصد رطوبت حجمی در شرایط اشباع،

ψ : مکش،

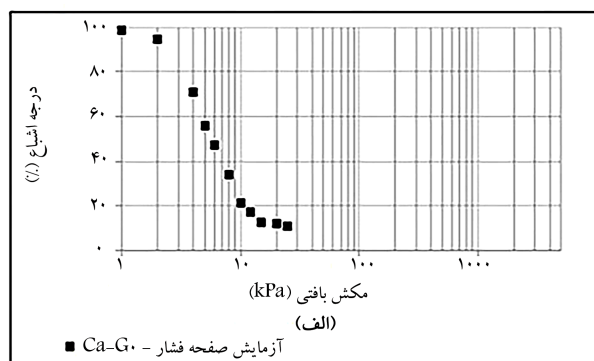
ψ_i : مکش در نقطه‌ی عطف منحنی،

θ_i : درصد رطوبت حجمی در نقطه‌ی عطف،

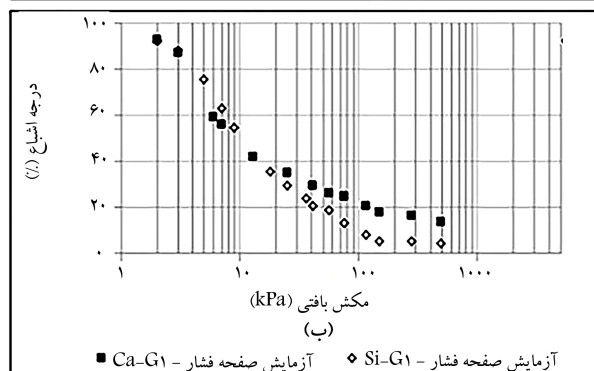
ψ_p : تقاطع خط مماس بر نقطه‌ی عطف منحنی با محور افقی.

نمودارهای انطباقی حاصل از رابطه‌ی ۱، در شکل‌های ۹ الی ۱۳ برای هر

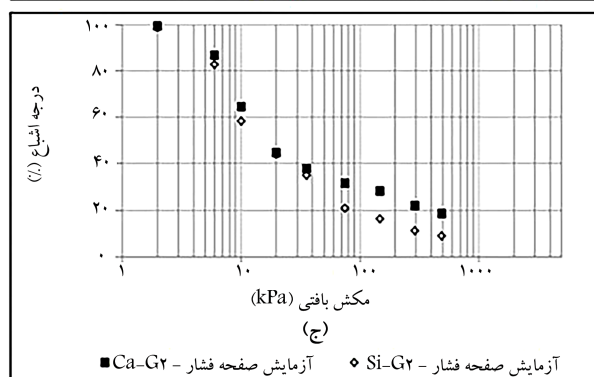
دو خاک کربناته و سیلیکاته مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، رابطه‌ی اخیر به خوبی



■ Ca-G₀ - آزمایش صفحه فشار - (الف)



■ Ca-G₁ - آزمایش صفحه فشار - (ب) ♦ Si-G₁ - آزمایش صفحه فشار



■ Ca-G₂ - آزمایش صفحه فشار - (ج) ♦ Si-G₂ - آزمایش صفحه فشار

شکل ۸. نمودار SWCC برای دانه‌بندی‌های مختلف خاک‌های کربناته و سیلیکاته (آزمایش صفحه‌ی فشار).

جدول ۲. نسبت‌های درجه اشباع کربناته به سیلیکاته برای G_۱ و G_۲.

مکش	Sr_{Ca} / Sr_{Si}	
	G _۱	G _۲
۱۴۸	۳٫۲۹	۱٫۷۱
۲۹۰	۳٫۱۰	۱٫۹۶
۴۹۰	۳٫۰۷	۲٫۱۱
میانگین	۳٫۱۵	۱٫۹۲
نسبت G _۱ /G _۲	۱٫۶۴	

مختلف به هدف ایجاد معادله‌های ریاضی و نمودار پیوسته برای نتایج آزمایش‌های اشاره شده با داشتن فقط چند نقطه ارائه شده و توسعه یافته است. [۲۷-۲۳، ۲۸] هر یک از روابط مذکور نقاط ضعف و قوتی دارند که توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است. [۲۹، ۲۸] در پژوهش حاضر، نقاط به‌دست آمده از نمودار SWCC با کمک رابطه‌ی انطباقی پیشنهادی فردلاند و زینگ (۱۹۹۴) برازش شده‌اند (رابطه‌ی

جدول ۳. پارامترهای انطباقی نمودارهای SWRC (مدل فردلانگ و زینگ (۱۹۹۴)).

Ψ_i	θ_i	θ_s	n	m	a	
۳٫۷	۰٫۳۳	۰٫۴۸	۲٫۴۷	۱٫۳۸	۳٫۷	Ca-G۰
۴٫۰	۰٫۳۴	۰٫۴۴	۲٫۰۵	۰٫۸۶	۴٫۰	Ca-G۱
۶٫۰	۰٫۴۰	۰٫۵۰	۱٫۸۳	۰٫۸۲	۶٫۰	Ca-G۲
۵٫۱	۰٫۳۴	۰٫۴۹	۲٫۱۰	۱٫۳۴	۵٫۱	Si-G۱
۶٫۵	۰٫۳۹	۰٫۵۴	۱٫۹۶	۱٫۱۹	۶٫۵	Si-G۲

شیب کمتر (n کمتر) برای خاک کربناته حاکی از آن است که پتانسیل نگهداشت در خاک کربناته، بیشتر از خاک سیلیکاته با دانه بندی یکسان است. به علاوه، همان طور که انتظار می‌رفت، برای هر دو خاک، با افزایش درصد ریزدانه، عدد ورودی هوا و پتانسیل نگهداشت آب افزایش یافته است.

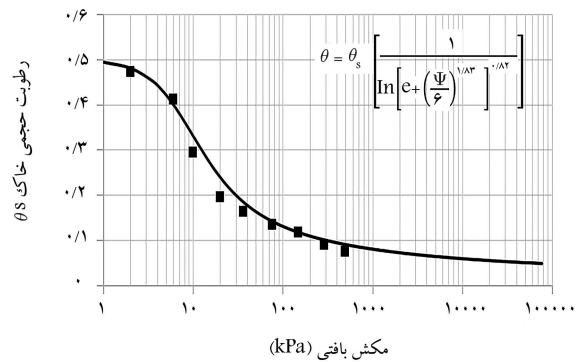
۳.۳. نتایج آزمایش های ادمتر کنترل مکش ۱.۳.۳. مقدمه

در طبیعت، حتی برای یک خاک مشخص، منحنی مشخصه ی آب - خاک ثابت و یگانه نیست. منحنی های SWCC تحت درصد رطوبت های مختلف برای یک خاک، بین دو مرز به نام نمودار اصلی ترشده گی^{۱۲} و نمودار اصلی خشک شده گی^{۱۳} قرار دارد. چنانچه خاک تا یک درجه اشباع میانی خشک شود و سپس تحت ترشده گی قرار بگیرد، نمودار مکش - درجه ی اشباع مرتبط که بین دو مرز اخیر قرار می‌گیرد، به عنوان منحنی پویشی^{۱۴} (اسکنینگ) شناخته می‌شود.

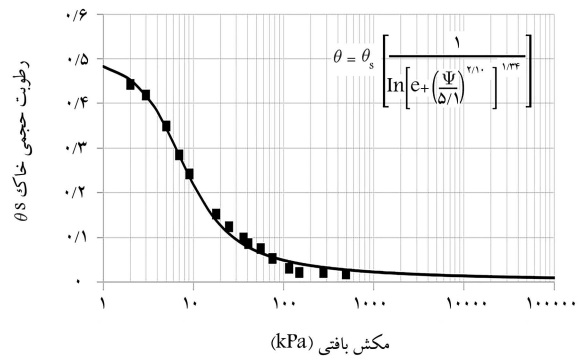
عوامل اصلی مؤثر در طبیعت هیستریزس منحنی مشخصه ی آب - خاک تحت شرایط تر و خشک شده گی، اثر معروف به بطری جوهر (مرتبط با توزیع اندازه ی حفره ها) و گیر افتادن هوا در حفره های کور در حین ترشده گی است.^{۱۳} برای مقایسه ی رفتار هیستریزس خاک های کربناته با خاک های سیلیکاته، یک سیکل هیستریزس (با اعمال یک مسیر خشک شده گی و سپس مسیر ترشده گی - خشک شده گی پایشی) به دانه بندی G۱ هر دو خاک اعمال و نتایج برای دو خاک مذکور مقایسه شد. شایان ذکر است نتایج نشان داد که تغییرات حجم برای هر دو نمونه، بسیار کم و با تقریب خوبی قابل صرف نظر کردن است.

۲.۳.۳. رفتار هیستریزس هیدرولیکی خاک های کربناته و سیلیکاته

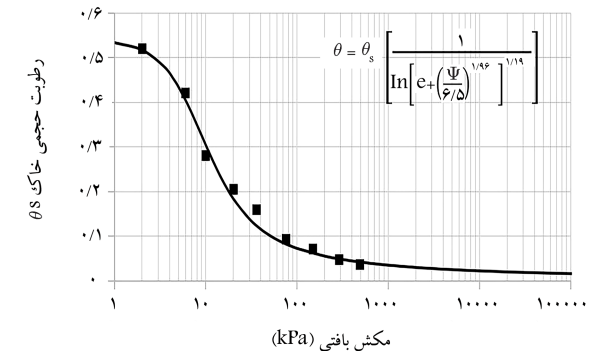
هدف اصلی بخش حاضر از مطالعات انجام شده، بررسی تأثیر احتمالی حفره های درون ذره یی مخصوص خاک های کربناته در رفتار هیستریزس هیدرولیکی آن هاست. نتایج آزمایش صورت گرفته با دستگاه ادمتر کنترل مکش بر روی نمونه های Ca-G۱ و Si-G۱ در شکل ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود. در مسیر خشک شده گی، نمونه ها تحت اعمال مکش از ۶ کیلو پاسکال (برای نمونه ی سیلیکاته از ۹ کیلو پاسکال) تا ۱۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند و به دنبال آن مسیر ترشده گی پایشی اعمال شد که در مسیر اشاره شده، مکش طی گام هایی برای هر دو نمونه به ۱۸ کیلو پاسکال کاهش و سپس مسیر خشک شده گی پایشی مجدداً طی گام هایی افزایش یافته است. دلیل انتخاب مکش ۱۸ کیلو پاسکال به عنوان نقطه ی بازگشت در حلقه ی هیستریزس مذکور این است (همان طور که قبلاً اشاره شد)، که بر اساس نتایج آزمایش صفحه ی فشار، منحنی SWCC برای دو خاک Ca-G۱ و Si-G۱ منحنی خشک شده گی اصلی دو خاک مذکور تا ۲۰ کیلو پاسکال مشابه بوده است، اما در مکش های بالاتر،



■ Ca-G۲ - آزمایش صفحه فشار — Fredlund-Xing (۱۹۹۴) fit
شکل ۱۱. نمودار انطباقی SWRC برای خاک Ca-G۲.



■ Si-G۱ - آزمایش صفحه فشار — Fredlund-Xing (۱۹۹۴) fit
شکل ۱۲. نمودار انطباقی SWRC برای خاک Si-G۱.

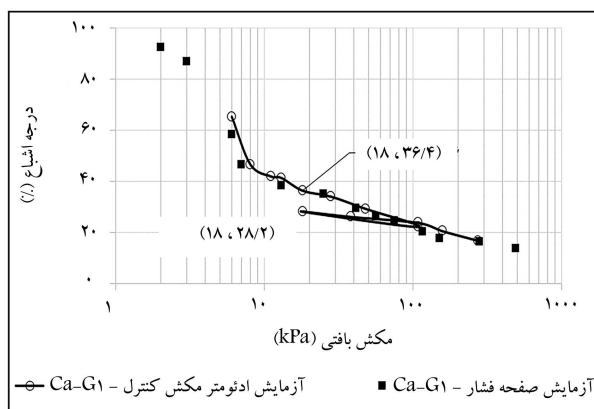


■ Si-G۲ - آزمایش صفحه فشار — Fredlund-Xing (۱۹۹۴) fit
شکل ۱۳. نمودار انطباقی SWRC برای خاک Si-G۲.

رفتار نگهداشت آب را برای هر دو خاک مورد آزمایش برآزش کرده است. مقادیر محاسبه شده پارامترهای مربوط به رابطه ی ۱) $(a, n, m, \text{ and } \theta_s)$ در جدول ۳ به صورت خلاصه ارائه شده اند. پارامترهای a و n در رابطه ی انطباقی $F - X$ (رابطه ی ۱)، به ترتیب نماینده ی عدد ورودی هوای خاک و شیب نمودار SWCC هستند. مقایسه پارامترهای ذکر شده (شکل های ۹ الی ۱۳) بین خاک های کربناته ی جزیره ی هرمز و سیلیکاته ی هلند نشان می‌دهد که پارامترهای a و n برای خاک سیلیکاته، بزرگ تر از خاک کربناته است. این امر نشان داد که خاک سیلیکاته، عدد ورودی هوای بزرگ تری نسبت به خاک کربناته با دانه بندی یکسان دارد و از طرف دیگر،

۳.۳.۳. مقایسه‌ی SWRC های به دست آمده از دستگاه صفحه‌ی فشار و ادمتر

اگرچه اساس کار هر دو دستگاه صفحه‌ی فشار و ادمتر کنترل مکش در اعمال مکش به نمونه‌ها، روش انتقال محور است؛ به دلیل وجود تفاوت‌هایی در دو دستگاه مذکور، امکان وجود اختلاف در نتایج آن‌ها وجود داشت. با وجود این، مقایسه‌ی صورت گرفته در شکل ۱۴ و ۱۵ بین نتایج دو دستگاه نشان می‌دهد اختلاف مسیر خشک‌شدگی اندازه‌گیری شده با دو دستگاه بسیار کم و قابل‌اعراض است که این امر نشان‌دهنده‌ی دقت بالای دستگاه‌های به کار رفته و نیز دقت و کارایی مناسب روش انتقال محور در اندازه‌گیری و اعمال مکش است.



شکل ۱۴. نمودار SWRC و یک حلقه هیستریزیس Ca-G1 (ادمتر مکش کنترل).

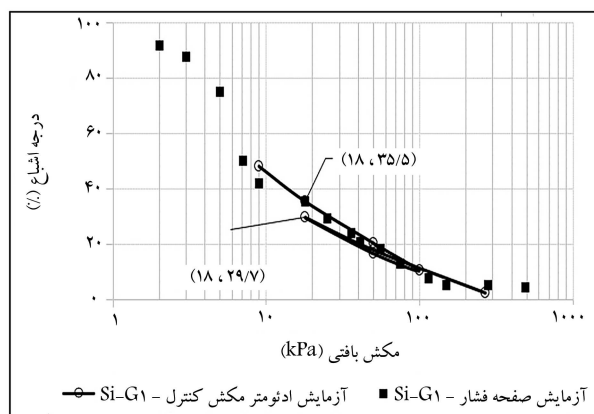
۴. نتیجه‌گیری

بیشتر خاک‌های نزدیک سطح زمین تحت شرایط غیراشباع قرار دارند. امروزه مسلم شده است که تفسیر مشخصات رفتاری خاک‌های غیراشباع با استفاده از تئوری‌های کلاسیک و قوانین رفتاری که برای خاک‌های اشباع به کار می‌رود، کاملاً امکان‌پذیر نیست. خاک‌های کربناته‌یی که تحت شرایط غیراشباع باشند، سهم قابل‌ملاحظه‌یی از زیرسازی سازه‌های کلیدی به‌خصوص در نواحی ساحلی را در بر گرفته‌اند. مطالعات نشان داده است که تفاوت‌های قابل‌توجهی بین رفتار خاک‌های کربناته و سیلیکاته وجود دارد که مانع از امکان تعمیم نتایج مطالعات انجام شده در زمینه‌ی خاک‌های سیلیکاته به کربناته می‌شود. با لحاظ کردن مکش در خاک به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی رفتاری خاک‌های غیراشباع در کنار نسبت منافذ بالای خاک‌های کربناته انتظار می‌رود قابلیت نگهداشت آب در خاک‌های کربناته و در نتیجه رفتار مکانیکی آن‌ها در شرایط غیراشباع متفاوت و پیچیده‌تر از خاک‌های سیلیکاته باشد. لذا در پژوهش حاضر، پس از ارزیابی کیفی و کمی حفره‌های درون‌ذره‌یی و بافت خاک کربناته (با استفاده از آزمایش‌های MIP و SEM)، با بهره‌گیری از آزمایش‌های صفحه‌ی فشار به مطالعه‌ی پتانسیل نگهداشت آب خاک کربناته و مقایسه‌ی آن با خاک سیلیکاته پرداخته شد. همچنین با به کارگیری دستگاه ادمتر مکش کنترل، رفتار هیستریزیس هیدرولیکی برای خاک کربناته مطالعه شد و این نتایج به دست آمده است:

۱. مقایسه‌ی تصاویر SEM برای دو خاک سیلیکاته و کربناته، حاکی از وجود تخلخل مضاعفی برای خاک کربناته در مقایسه با خاک سیلیکاته است. برخلاف ذرات خاک سیلیکاته‌ی هلند، ذرات خاک کربناته‌ی جزیره‌ی هرمز، حفره‌های درون‌ذره‌یی قابل توجه با اندازه‌های مختلف دارند که از ویژگی‌های متحصص به‌فرد خاک‌های کربناته به‌شمار می‌آیند.

۲. نتایج آزمایش‌های MIP بر روی هر سه دانه‌بندی خاک کربناته نشان داد که تخلخل درون‌ذره‌یی برای دانه‌بندی‌های مختلف خاک کربناته قابل ملاحظه است. حجم در واحد جرم، تخلخل درون‌ذره‌یی و متداول‌ترین قطر حفره‌ها در ذرات خاک با افزایش درصد ریزدانه‌ی نمونه کاهش می‌یابد.

۳. نتایج آزمایش‌های صفحه‌ی فشار نشان داد که به دلیل دانه‌بندی مشابه برای خاک‌های سیلیکاته و کربناته‌ی موردآزمایش، SWCC برای دانه‌بندی G1 دو خاک کربناته و سیلیکاته تا حدود ۲۰ کیلوپاسکال و برای دانه‌بندی G2 آن‌ها تا حدود ۴۰ کیلوپاسکال یکسان و نمودارها بر هم منطبق بوده‌اند. در مکش‌های بالاتر، نمودارهای آن‌ها از هم فاصله گرفته است، بدین صورت که نمودار SWRC برای خاک کربناته با شیب کمتری نسبت به خاک سیلیکاته با دانه‌بندی مشابه



شکل ۱۵. نمودار SWRC و یک حلقه هیستریزیس Si-G1 (ادمتر مکش کنترل).

نمودارهای آن‌ها از هم فاصله می‌گیرد؛ لذا این انتخاب کمک می‌کند که مقایسه‌ی انجام شده به نحو بهتری تأثیر حفره‌های درون‌ذره‌یی را در رفتار هیستریزیس خاک کربناته نشان دهد. نتایج نشان می‌دهد که نسبت کاهش درجه‌ی اشباع در مکش ۱۸ کیلوپاسکال در مسیر ترشدگی برای خاک کربناته (۳۰٪) بیشتر از خاک سیلیکاته (۲۰٪) است:

$$\left(\frac{Sr_d^{18} - Sr_w^{18}}{Sr_w^{18}} \right) \times 100 = \frac{36/4 - 28/2}{28/2} \times 100 \approx 30\%$$

$$\left(\frac{Sr_d^{18} - Sr_w^{18}}{Sr_w^{18}} \right) \times 100 = \frac{35/5 - 29/7}{29/7} \times 100 \approx 20\%$$

با توجه به یکسان بودن منحنی دانه‌بندی و چگالی نسبی دو نمونه‌ی کربناته و سیلیکاته‌ی مورد آزمایش، عامل اصلی تفاوت، تخلخل دوگانه‌ی خاک کربناته (ناشی از وجود حفره‌های درون‌ذره‌یی در خاک کربناته) است. همان‌گونه که اشاره شد، دو عامل اصلی مؤثر در طبیعت هیستریزیس منحنی نگهداشت آب - خاک، اثر بطری جوهر و گیر افتادن هوا در حفره‌های کور است، که اثر بطری جوهر مرتبط با توزیع متنوع اندازه‌ی حفره‌هاست و این امر به دلیل وجود حفره‌های درون‌ذره‌یی در خاک کربناته چشم‌گیرتر و تأثیرگذارتر بوده است. به علاوه، وجود این تخلخل دوگانه در خاک کربناته، باعث پیدایش حفره‌های کور بیشتر و در نتیجه محبوس شدن بیشتر هوا در حین فرایند ترشدگی و در نتیجه کاهش بیشتر نسبت درجه‌ی اشباع در این مسیر برای آن است.

آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که تخلخل درون‌ذره‌یی خاص خاک‌های کربناته باعث تشدید آثار هیستریزیس هیدرولیکی بر نمونه‌های خاک کربناته می‌شود.

۷. اثر بطری جوهر در خاک کربناته چشم‌گیرتر و تأثیرگذارتر از خاک سیلیکاته است، این امر به دلیل توزیع متنوع اندازه‌ی حفره‌هاست که به دلیل وجود حفره‌های درون‌ذره‌یی است.

۸. وجود تخلخل دوگانه در خاک کربناته باعث پیدایش حفره‌های کور بیشتر، محبوس شدن بیشتر هوا در حین فرایند ترشدگی و در نتیجه کاهش بیشتر نسبت درجه اشباع در مسیر خشک‌شدگی برای آن و تشدید اثر هیستریزیس در خاک‌های کربناته است.

تقدیر و تشکر

کلیدیه آزمایش‌های غیراشباع پژوهش حاضر در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه پلی‌تکنیک فدرال لوزان انجام شده است. از حمایت‌های فنی مجموعه‌ی نامبرده و راهنمایی‌های ارزشمند پروفیسور لالویی و پروفیسور فراری صمیمانه قدردانی می‌شود.

پانویس‌ها

1. soil-water characteristic
2. axis transition
3. pressure plate extractor
4. intra-particle void
5. scanning electron microscope
6. mercury intrusion porosimetry
7. laboratory of soil mechanics
8. Ecole polytechnique fedeeale de lausanne
9. high air entry value ceramic disks
10. linear variable differential transformer (LVDT)
11. fitting curves
12. main wetting curve
13. main drying curve
14. scanning curve

منابع (References)

1. Blatz, J.A., Cui, Y.-J. and Oldecop, L. "Vapour equilibrium and osmotic technique for suction control", Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils, Springer, pp. 49-61 (2008).
2. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons (1993).
3. Konrad, J.-M. and Lebeau, M. "Capillary-based effective stress formulation for predicting shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(12), pp. 2067-2076 (2015).
4. Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. and et al. "Estimating generalized soil-water characteristics from

ادامه پیدا کرده است؛ به عبارت دیگر، در مکش‌های بالاتر، خاکه‌های درون‌ذره‌یی در خاک کربناته است.

۴. نتایج آزمایش صفحه‌ی فشار برای هر دو خاک کربناته و سیلیکاته با دقت مناسبی با رابطه‌ی انطباقی F-X برازش شده است.

۵. مقایسه‌ی پارامترهای n و a در رابطه‌ی انطباقی F-X که به ترتیب نماینده‌ی عدد ورودی هوای خاک و شیب نمودار SWCC هستند، نشان می‌دهد که پارامترهای n و a برای خاک سیلیکاته، بزرگ‌تر از خاک کربناته است. این امر نشان می‌دهد که خاک سیلیکاته، عدد ورودی هوای بزرگ‌تری نسبت به خاک کربناته با دانه‌بندی یکسان دارد. از طرف دیگر، شیب کمتر برای خاک کربناته حاکی از آن است که پتانسیل نگهداشت در خاک کربناته بیشتر از سیلیکاته با دانه‌بندی یکسان است.

۶. نتایج آزمایش با دستگاه ادمتر مکش کنترل و اعمال هیستریزیس هیدرولیکی به نمونه‌های کربناته و سیلیکاته نشان داد که نسبت کاهش درجه‌ی اشباع در مسیر ترشدگی برای خاک کربناته بیشتر از خاک سیلیکاته است. با توجه به یکسان بودن منحنی دانه‌بندی و چگالی نسبی دو نمونه‌ی کربناته و سیلیکاته‌ی مورد

texture 1", *Soil Science Society of America Journal*, **50**(4), pp. 1031-1036 (1986).

5. Zhou, A.-N., Sheng, D. and Li, J. "Modelling water retention and volume change behaviours of unsaturated soils in non-isothermal conditions", *Computers and Geotechnics*, **55**, pp. 1-13 (2014).
6. Wang, L., Huang, C. and Huang, L. "Parameter estimation of the soil water retention curve model with Jaya algorithm", *Computers and Electronics in Agriculture*, **151**, pp. 349-353 (2018).
7. Zapata, C.E., Houston, W.N., Houston, S. and et al. "Soil-water characteristic curve variability", *Geotech. spec. publ.*, **99**, pp. 84-124 (2000).
8. Botula, Y.-D., Cornelis, W.M., Baert, G. and et al. "Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo)", *Agricultural Water Management*, **111**, pp. 1-10 (2000).
9. API, S. "Recommended Practice for Planning", Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design (2000).
10. Sharma, S.S. and Ismail, M.A. "Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(12), pp. 1581-1591 (2006).
11. Nicholson, P.G. "Liquefaction evaluation discrepancies in tropical lagoonal soils", *Geotechnical & Geological Engineering*, **24**(5), pp. 1259-1269 (2006).
12. Coop, M. and Airey, D. "Carbonate sands", *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, pp. 1049-1086 (2003).

13. Brandes, H. "Simple shear behavior of calcareous and quartz sands", *Geotechnical and Geological Engineering*, **29**(1), pp. 113-126 (2011).
14. Coop, M. "The mechanics of uncemented carbonate sands", *Geotechnique*, **40**(4), pp. 607-626 (1990).
15. Dehnavi, Y. "Evaluation of shear modulus and damping ratio of sands containing carbonate particles", Ph.D Thesis, Iran University of Science and Technology (IUST) (2011).
16. Farshbaf, H. "Studying the induced anisotropy effect on the mechanical behavior of the Bushehr Carbonate Sand in Undrained State", Ph.D Thesis, Iran University of Science and Technology (IUST) (2015).
17. Rezvani, R. "Post-Cyclic volumetric strain in saturated calcareous soil", Ph.D thesis, Iran University of Science and Technology (IUST) (2016).
18. Shahnazari, H., Rezvani, R. and Tutunchian, M.A. "Experimental study on the phase transformation point of crushable and non-crushable soils", *Marine Georesources & Geotechnology*, **35**(2), pp. 176-185 (2017).
19. Tutunchian, M.A. "Assessment of liquefaction potential of uncemented calcareous sands using cyclic tests", Ph.D thesis, Iran University of Science and Technology (IUST) (2016).
20. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H. "Mechanical properties of ungrouted and grouted carbonate sands", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **4**(4), pp. 507-516 (2010).
21. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H. "Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands", *International Journal of Civil Engineering*, **9**(4), pp. 307-314 (2011).
22. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H. "Drained shear strength of carbonate sands based on energy approach", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **8**(1), pp. 1-9 (2014).
23. Abertin, B. and Chapuis, R.P. "A Model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties", *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(6), pp. 1104-1122 (2003).
24. Brooks, R. and Corey, T. "HYDRAU uc properties of porous media", Papers Colorado State University Fort Collins, Colorado (1964).
25. Bumb, A.C., Murphy, C.L. and Everett, L.G. "A comparison of three functional forms for representing soil moisture characteristics", *Groundwater*, **30**(2), pp. 177-185 (1992).
26. Fredlund, D.G. and Xing, A. "Equations for the soil-water characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(4), pp. 521-532 (1994).
27. Van Genuchten, M.T. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1", *Soil Science Society of America journal*, **44**(5), pp. 898-892 (1980).
28. Leij, F.J., Russell, W.B. and Lesch, S.M. "Closed-form expressions for water retention and conductivity data", *Groundwater*, **35**(5), pp. 848-858 (1997).
29. Burger, C.A. and Shackelford, C.D. "Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions", *Canadian Geotechnical Journal*, **38**(1), pp. 53-66 (2001).
30. Leong, E.C. and Rahardjo, H. "Review of soil-water characteristic curve equations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**(12), pp. 1106-1117 (1997).
31. Laloui, L. "Mechanics of unsaturated geomaterials", John Wiley & Sons (2013).